

УДК 621.314.21

EDN: HZQLVP

ОБ УЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА 6-20 КВ

А.А. Кокорев

ORCID: 0009-0008-1801-2372 e-mail: kokandrey@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Е.Н. Соснина**

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Силовые трансформаторы 6-20 кВ распределительных электрических сетей являются ключевым элементом систем электроснабжения потребителей. К надежности их работы предъявляются повышенные требования, поэтому вопросы обеспечения качества мониторинга технического состояния трансформаторов актуальны. Системы мониторинга используют в качестве основного критерия отклонение фактических параметров холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) трансформаторов от паспортных. При работе трансформаторы подвергаются непрерывному нагреву как от внутренних, так и внешних источников теплоты. Под воздействием нагрева изменяются электрические, магнитные и другие свойства материалов, из которых изготовлен трансформатор. Изменение свойств приводит в большинстве случаев к изменению параметров ХХ и КЗ. В существующих системах мониторинга отсутствует температурная коррекция параметров трансформаторов, что приводит к необходимости «заглубления» критерия оценки стадии развития дефекта. Статья посвящена разработке методики, учитывающей изменение свойств материалов активной части трансформаторов вследствие ее нагрева. Методика позволит разработать алгоритм мониторинга СТ с более «четкими» критериями оценки его технического состояния.

Ключевые слова: силовой трансформатор, системы проактивного мониторинга, тепловая модель, схема замещения, коэффициент температурной коррекции.

Для цитирования: Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Об учете коэффициента температурной коррекции при мониторинге силового трансформатора 6-20 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 2. С. 69-82. EDN HZQLVP

ON CONSIDERATION OF TEMPERATURE CORRECTION COEFFICIENT IN 6-20 kV POWER TRANSFORMER MONITORING

A.A. Kokorev

ORCID: 0009-0008-1801-2372 e-mail: kokandrey@gmail.com

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

E.N. Sosnina

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The 6-20 kV power transformers are a key element of power supply systems for consumers. Increased requirements are placed on the reliability of their operation, therefore, the issues of ensuring the quality of monitoring the transformers technical condition are an urgent task. Monitoring systems use the deviation of the actual parameters of the transformer idling and short circuit from the passport ones as the main criterion. Power transformers is continuously heated from both internal and external heat sources during operation. The electrical, magnetic and other properties of the transformer materials are made change under the heating influence. Changing the properties leads, in most cases, to a change in the idling and short circuit parameters. There is no temperature correction of transformers parameters in existing monitoring systems, which leads to the need to "roughen" the criterion for assessing the stage of defect development. The article is devoted to the development of a technique that takes into account the change in the materials properties of the transformer active part due to its heating. The technique will allow to develop an algorithm for monitoring the transformer with more «clear» criteria for assessing its technical condition.

Keywords: power transformer, proactive diagnostics, monitoring systems, thermal model, substitution scheme, temperature correction coefficient.

For citation: A.A. Kokorev and E.N. Sosnina, "On consideration of temperature correction coefficient in 6-20 kV power transformer monitoring", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 69-82, 2024. EDN HZQLVP

I. Введение

Силовые трансформаторы (СТ) 6-10/0,4 кВ – ключевой элемент систем электроснабжения (СЭС) потребителей. СТ подвержены воздействию разнообразных внешних факторов (отклонение напряжения питания, протекание сверхтоков, индуктивные и кондуктивные электромагнитные помехи, широкий диапазон температур, атмосферные осадки и др.), влияющих на их

режимы работы [1], параметры и эксплуатацию [2-5]. Повреждение СТ приводит к значительным затратам, связанным с его ремонтом или заменой, недоотпуском электроэнергии, перерывом в электроснабжении потребителей и т.д. Причины повреждений СТ разнообразны, но в большинстве случаев связаны с пробоем изоляции обмоток, начинающимся с виткового замыкания обмотки высшего напряжения (ВН). Данный вид повреждения не сопровождается значительным увеличением тока в питающей сети и может быть обнаружен только после того, как оно перерастет в значительное повреждение (замыкания около 70 %) [6].

Надежная работа элементов СЭС во многом зависит от устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), обеспечивающих своевременное выявление и отключение поврежденных элементов. Одним из основных требований, предъявляемых к РЗА, является чувствительность – свойство защиты, обеспечивающее выявление повреждения электрооборудования в начале его возникновения. Однако устройства РЗА, применяемые для СТ распределительных сетей 6-20 кВ, не обладают достаточной чувствительностью к внутренним повреждениям. Выявить нарушения в работе СТ на ранней стадии развития дефекта позволяют системы проактивного (упреждающего) мониторинга.

Существует множество способов определения параметров двухобмоточных СТ, одним из которых является замена трансформатора пассивным четырехполосником. Вариантом внутренней структуры четырехполосника является Т-образная схема замещения, которая соответствует схеме замещения СТ. Параметры четырехполосника (в частности, А-параметры) могут быть получены по результатам замеров тока и напряжения обмоток ВН и низшего напряжения (НН), позволяющих определить параметры схемы замещения четырехполосника. О характере и стадии развития дефекта можно судить по отклонению фактических параметров СТ от параметров, описываемых математической моделью. Чем большее количество внутренних и внешних факторов учитывает математическая модель СТ, тем она точнее и тем корректней будет работать система мониторинга. Существенное влияние на параметры СТ (напряжение и потери КЗ) оказывает температура активной части [4, 7]. Однако в применяемых математических моделях СТ не учитывается влияние внешних факторов.

Целью исследований является разработка методики, учитывающей изменение свойств материалов активной части трансформатора вследствие ее нагрева. Методика позволит разработать алгоритм мониторинга СТ с более «четкими» критериями оценки его технического состояния.

II. Параметры силовых трансформаторов 6-20 кВ

СТ 6-20 кВ широко применяются в распределительных электрических сетях с изолированной нейтралью со схемами соединения обмоток

«треугольник/звезда с выведенной нейтральной точкой» и «звезда/звезда с выведенной нейтральной точкой». В большинстве случаев они оборудуются устройствами переключения напряжения без возбуждения (ПВВ). Преимущественный диапазон регулирования ПВВ составляет $\pm 2 \times 2,5\%$, регулировочные витки располагаются в средней части обмотки СТ. Основными параметрами, характеризующими СТ, являются номинальная мощность, напряжение обмоток, потери и ток холостого хода (ХХ), потери и напряжение короткого замыкания (КЗ). Удельные потери КЗ для трансформаторов 6-20 кВ значительны, что приводит к необходимости учитывать активную составляющую при расчете параметров схемы замещения [8].

Анализировать работу СТ в установившихся и переходных режимах принято с применением электрической схемы замещения (рис. 1), описывающей с достаточной точностью процессы, протекающие в активной части.

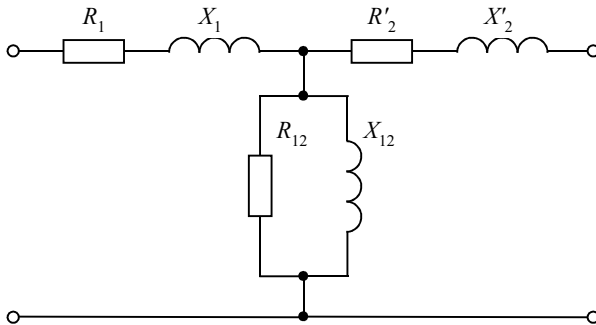


Рис. 1. Т-образная схема замещения трансформатора

Fig. 1. T-substitution diagram of a transformer

Параметры схемы замещения (рис. 1) связаны с параметрами СТ известными соотношениями:

$$Z_{\tau} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}^{k\%}}; \quad (1)$$

$$R_{\tau} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2};$$

$$X_{\tau} = \sqrt{Z_{\tau}^2 - R_{\tau}^2};$$

$$R_1 = R'_2 = 0,5 R_{\tau};$$

$$X_1 = X'_2 = 0,5 X_{\tau}; \quad (2)$$

$$X_{12} = \frac{100U_{\text{ном}}^2}{I_{x\%} S_{\text{ном}}};$$

$$R_{12} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\Delta P_x},$$

где Z_T – сквозное полное сопротивление СТ, Ом; $U_{k\%}$ – напряжение КЗ, %; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение обмотки ВН, В; $S_{\text{ном}}$ – номинальная полная мощность СТ, В·А; R_T , X_T – сквозные активное и индуктивное сопротивления СТ, Ом; ΔP_k – активные потери КЗ, Вт; R_1 , X_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки ВН, Ом; R'_2 , X'_2 – активное и индуктивное сопротивления обмотки НН, приведенные к обмотке ВН, Ом; R_{12} , X_{12} – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания СТ, Ом; $I_{x\%}$ – ток XX, %; ΔP_x – активные потери XX, Вт.

III. Применение систем мониторинга

Системы мониторинга масляных СТ в большинстве случаев устанавливаются на наиболее ответственное и дорогостоящее трансформаторное оборудование, к которому относятся СТ мощностью более 8 МВ·А и классом напряжения 110 кВ и выше районных и узловых понизительных подстанций. Значительный износ [9], особенности эксплуатации, точечное возрастание нагрузок СТ распределительных сетей 6-20 кВ, повышение требований к качеству и надежности электроснабжения потребителей привели к необходимости внедрения систем мониторинга для трансформаторов меньшей мощности и меньшего напряжения обмотки ВН [10].

Одним из основных блоков систем мониторинга является математическая модель СТ. В большинстве применяемых математических моделей СТ влияние внешних факторов не учитывается. Поэтому для нормального функционирования существующих систем мониторинга технического состояния СТ требуется или «загружать» или выполнять критерии оценки состояния «сверхчувствительными», что снижает качество систем мониторинга. «Загружение» приводит к нечувствительности в некоторых режимах к начальным стадиям развития внутренних повреждений СТ. Применение «сверхчувствительных» критериев, наоборот, приводит к ложному срабатыванию. На рис. 2 представлена зависимость отклонения потерь КЗ (в отн. ед.) при изменении температуры активной части и отражено поведение систем мониторинга при «сверхчувствительной», «загруженной» и «требуемой» уставках выявления дефекта СТ.

Авторами разработана методика, с помощью коэффициента тепловой коррекции учитывающая изменение свойств материалов активной части трансформатора вследствие ее нагрева.

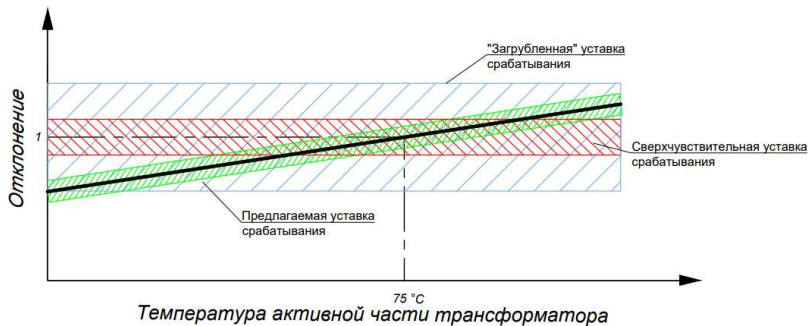


Рис. 2. Зависимость потерь КЗ СТ от температуры активной части и уставки срабатывания системы мониторинга

Fig. 2. Transformer parameter variation from core temperature and monitoring system setpoints

IV. Определение параметров СТ с учетом изменения свойств активной части трансформатора вследствие ее нагрева

Для разработки методики, учитывающей изменение свойств активной части СТ вследствие ее нагрева, рассмотрены физические основы возникновения этих параметров, методы их определения и влияние на них температуры. Потери КЗ связаны с потерями в активных сопротивлениях обмоток, магнитопроводе и других токопроводящих элементах конструкции СТ. Согласно ГОСТ [11, 12] потери КЗ в трансформаторе складываются из основных, возникающих в активном сопротивлении проводников обмоток, и добавочных потерь, за счет наводимой ЭДС взаимной индукции в элементах. Каждая составляющая потерь имеет свою зависимость от температуры:

$$\Delta P_{к. \Theta} = \Delta P_{осн. \Theta} + \Delta P_{доб. \Theta};$$

$$\Delta P_{осн. \Theta} = k_{R. \Theta} \Delta P_{осн. \Theta_p};$$

$$\Delta P_{доб. \Theta} = \frac{\Delta P_{доб. \Theta_p}}{k_{R. \Theta}};$$

$$k_{R. \Theta} = \frac{T_R + \Theta_c}{T_R + \Theta_p};$$

где $k_{R. \Theta}$ – коэффициент температурной коррекции активного сопротивления продольных ветвей, отн. ед.; T_R – температура, °C (235 °C для меди и 225 °C для алюминия); Θ_p – расчетная условная температура обмотки (принимается 75 °C для СТ с классом изоляции А); Θ_c – средняя температура обмотки, °C.

Основные и добавочные потери при расчетной температуре Θ_p определяются через потери КЗ ΔP_k , (из паспорта трансформатора или при электромагнитных испытаниях):

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{осн.}\Theta_p} &= k_d \Delta P_{k.n}; \\ \Delta P_{\text{доб.}\Theta_p} &= (1 - k_d) \Delta P_k,\end{aligned}$$

где $\Delta P_{k.n}$ – паспортные (номинальные) потери КЗ, кВт; k_d – коэффициент добавочных потерь.

Напряжение КЗ имеет две ортогональные составляющие [13]:

– активную:

$$U_{k.a\%} = \frac{\Delta P_k}{S_{\text{ном}}} 100;$$

– реактивную:

$$U_{k.p\%} = \frac{7,9 f S' \pi d_{12} a_p k_p k_q}{u_b^2 l} 10^{-1}, \quad (3)$$

где f – частота питающей сети, Гц; S' – полная мощность, приходящаяся на один стержень СТ, кВт·А; d_{12} – средний диаметр канала между обмотками, м; a_p – ширина приведенного канала рассеяния, м; k_p – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского), отн.ед.; k_q – коэффициент учитывающий взаимное расположение обмоток, отн.ед.; u_b – напряжение одного витка, В; l – высота обмотки, м (основные геометрические размеры обмоток приведены на рис. 3).

Полная мощность, приходящаяся на один стержень СТ:

$$S' = \frac{S_{\text{ном}}}{c},$$

где c – количество стержней магнитопровода, шт.

Ширина приведенного канала рассеяния a_p в случаях, когда радиальные размеры обмоток a_1 и a_2 мало отличаются (для СТ распределительной сети 6–20 кВ), может быть принята равной

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (4)$$

где a_1, a_2 – радиальные размеры обмоток НН и ВН, м; a_{12} – ширина канала охлаждения между обмотками НН и ВН, м.

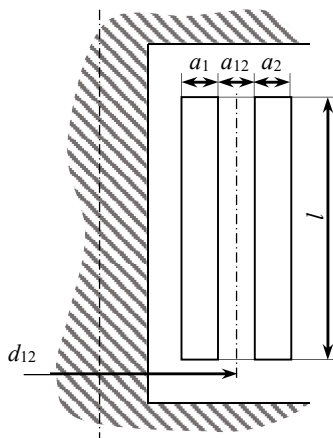


Рис. 3. Основные геометрические размеры обмоток трансформатора

Fig. 3. Basic geometrical dimensions of transformer windings

Коэффициент k_p , учитывающий отклонение реального распределения магнитного поля рассеяния от параллельного поля, связанного с конечной длиной обмотки для концентрического расположения обмоток:

$$k_p = 1 - \sigma \left(1 - e^{-1/\sigma} \right), \quad (5)$$

где

$$\sigma = \frac{a_1 + a_{12} + a_2}{\pi l} \quad (6)$$

Неравномерное распределение нагруженных током витков обмотки по высоте приводит к искажению магнитного поля рассеяния, которое в упрощенном виде может быть представлено в виде суммы двух полей: продольного и поперечного. Это искажение учитывается коэффициентом

$$k_q \approx 1 + \frac{l x^2}{m a_p k_p}, \quad (7)$$

где $x = l_x/l$ – часть разности высот обмотки относительно полной высоты обмотки (рис. 4), отн.ед.; m – множитель, применяемый в зависимости от взаимного расположения разновысотных обмоток, отн.ед. ($m = 3$ для рис. 4, а и в; $m = 0,75$ для рис. 4, б).

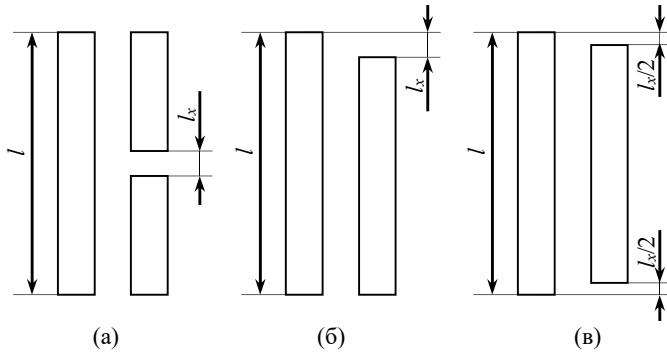


Рис. 4. Варианты взаимного расположения нагруженных током витков обмоток трансформатора

Fig. 4. Variants of mutual arrangement of current-loaded turns of transformer windings

В СТ распределительных сетей 6-20 кВ с устройствами ПБВ регулировочные витки как правило располагаются в средней части обмотки ВН.

По найденным значениям составляющих напряжения КЗ определяется полное напряжение КЗ:

$$U_{к\%} = \sqrt{U_{к.а\%}^2 + U_{к.р\%}^2}.$$

Для СТ активная составляющая напряжения КЗ незначительна, и ее изменение не оказывает существенного влияния на полное напряжение КЗ.

Из (3)-(7) следует, что реактивная составляющая напряжения КЗ зависит от геометрических размеров обмоток. В процессе эксплуатации обмотки подвергаются различным токовым нагрузкам, что приводит к изменению их температуры и геометрических размеров и, как следствие, к изменению реактивной составляющей КЗ. Изменение геометрических размеров в зависимости от температуры имеет линейный характер. Наибольшее влияние на изменение реактивной составляющей напряжения КЗ будет оказывать средний диаметр канала между обмотками.

Для двухобмоточных СТ указывается одно значение напряжения КЗ и принимается, что сквозное полное сопротивление, определенное по (1), равномерно распределяется по двум ветвям схемы замещения (2) (рис. 1). Этот факт не является решающим при проведении расчетов установившихся и переходных режимов вне СТ, но оказывает существенное влияние при возникновении внутренних повреждений. По этой причине вопросу

распределения индуктивных сопротивлений между обмотками следует уделить особое внимание. Для этого введем фиктивную обмотку, расположенную посередине между обмотками ВН и НН, шириной a_{ϕ} , меньшей чем канал охлаждения между обмотками ВН и НН a_{12} , высотой, равной высоте обмоток ВН и НН l , и которая не изменяет свой размер и положение (рис. 5).

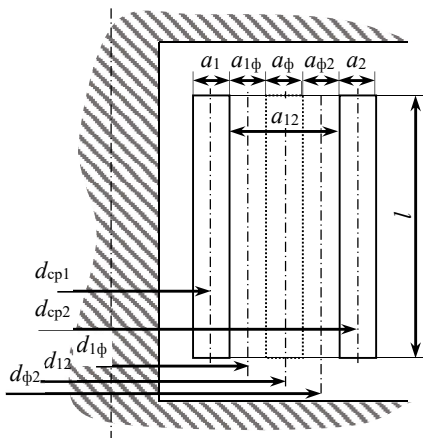


Рис. 5. Основные геометрические размеры обмоток трансформатора с введенной фиктивной обмоткой

Fig. 5. Basic geometrical dimensions of transformer windings with introduced dummy winding

При нагревании обмоток происходит линейное расширение, при этом увеличиваются как радиальные размеры обмоток НН и ВН (a_1 и a_2), так и их средние диаметры d_{cp1} и d_{cp2} . Так как радиальные размеры обмоток по сравнению со средней длиной витка малы, их изменением пренебрегаем.

Проведем анализ изменения относительного положения обмоток. Удлинение средней длины витка обмотки НН d_{cp1} приведет к увеличению среднего диаметра канала между фиктивной обмоткой и обмоткой НН и уменьшению ширины канала охлаждения между этими обмотками. Однако влияние уменьшения ширины канала охлаждения оказывает более сильное влияние (примерно в два раза) на реактивную составляющую напряжения КЗ ($U_{к,р\%1-\phi}$), в результате чего это напряжение уменьшится. Проведя аналогичные рассуждения для пар обмоток фиктивная-ВН и ВН-НН можно сделать вывод, что реактивная составляющая напряжения КЗ между парой обмоток фиктивная-ВН ($U_{к,р\%ф-2}$) – увеличится, а между ВН-НН ($U_{к,р\%1-2}$) – не изменится.

Представляя двухобмоточный трансформатор в виде трехобмоточного с третьей фиктивной обмоткой, можно применить формулы для определения изменения напряжения КЗ каждой обмотки:

$$U_{к.р\%1} = 0,5(U_{к.р\%1-ф} + U_{к.р\%1-2} - U_{к.р\%ф-2}); \quad (8)$$

$$U_{к.р\%2} = 0,5(U_{к.р\%ф-2} + U_{к.р\%1-2} - U_{к.р\%1-ф}); \quad (9)$$

$$U_{к.р\%ф} = 0,5(U_{к.р\%1-ф} + U_{к.р\%ф-2} - U_{к.р\%1-2}).$$

Анализ (8) и (9) позволяет сделать вывод о перераспределении индуктивных сопротивлений между обмотками ВН и НН при неизменном сквозном индуктивном сопротивлении СТ. Данное перераспределение индуктивных сопротивлений обмоток предлагается учитывать коэффициентом температурной коррекции $k_{X,\Theta}$ индуктивного сопротивления продольных ветвей.

Тогда, принимая индуктивные сопротивления обмоток трансформатора при расчетной температуре Θ_p равными:

$$X_{1,\Theta_p} = X'_{2,\Theta_p} = 0,5X_T,$$

при фактической температуре обмоток Θ они могут быть определены как:

$$X_{1,\Theta} = k_{X,\Theta} X_{1,\Theta_p};$$

$$X_{2,\Theta} = (2 - k_{X,\Theta}) X_{2,\Theta_p},$$

где $k_{X,\Theta}$ – коэффициент температурной коррекции индуктивного сопротивления продольных ветвей, отн.ед.:

$$k_{X,\Theta} = \frac{T_X + \Theta}{T_X + \Theta_p};$$

где T_X – температура, зависящая от материала и геометрических размеров обмоток, °С.

IV. Выводы

Применение методики определения параметров СТ с учетом влияния нагрева его активной части при разработке алгоритмов диагностики позволяет повысить качество мониторинга СТ и выявлять внутренние дефекты на ранней стадии их развития.

Прямое определение коэффициента температурной коррекции индуктивного сопротивления продольной ветви является сложной задачей и требует данных о конструктивных особенностях обмоток и магнитопровода СТ. При разработке системы мониторинга СТ с применением методики необходим блок «самообучения», проводимого на заведомо исправном СТ при непосредственном или косвенном определении температуры активной части трансформатора.

© Кокорев А.А., 2024

© Соснина Е.Н., 2024

Поступила в редакцию 13.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

Received 13.05.2024

Accepted 30.05.2024

Библиографический список

- [1] Приказ Минэнерго России от 08.02.2019 г. N 81 «Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и ее поддержанию и о внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. N 229» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903290030> (дата обращения 23.05.2024).
- [2] Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 № 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210070065> (дата обращения 23.05.2024).
- [3] Жилкина Ю.В., Воденников Д.А. Влияние повышения температуры наружного воздуха на работу силовых трансформаторов // Вестник МЭИ. 2023. № 6. С. 26-32. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-6-26-32
- [4] Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Исследование влияния температуры окружающей среды на характеристики силового трансформатора // V Всерос. научно-практическая конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», Октябрь 11–12, 2023, Казань, Россия. Казань: КГЭУ, 2023. Т. 1. С. 104-109.
- [5] Жаринов И.В., Кокорев А.А., Мясников Д.В. Исследование влияния условий эксплуатации на работу трансформаторов в режиме холостого хода // Научные известия. 2022. № 28. С. 195-198.
- [6] Алюнов А.Н., Вяткина О.С., Немировский А.Е. Об эффективности цифровой системы проактивной диагностики силовых трансформаторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5(154). С. 966–976. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-966-976

- [7] Костинский С.С., Васильева К.В. Экспериментальное определение влияния температуры на потери холостого хода и коэффициент трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора // Известия Высших Учебных Заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 4. С. 56-62. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-4-56-62
- [8] ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. Введ. 1995-01-01. М.: Стандартинформ, 2006. – 45 с.
- [9] Уровень физического износа оборудования // Россети Центр и Поволжье. [Электронный ресурс]. URL: https://mrsk-cp.ru/stockholder_investor/performance/index.php?iblock_id=114. (Дата обращения 11.05.2024).
- [10] Цырук С.А., Киреева Э.А. Повышение эксплуатационной надежности силовых трансформаторов, отработавших нормативный срок службы // Промышленная энергетика. 2008. № 3. С. 11-15.
- [11] ГОСТ 3484.1-88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. Введ. 1990-01-01. М.: Издательство стандартов, 1989.
- [12] Zhang C., Gao S., Zhou L., Jiang J., Cai J. Novel analytical formulas for eddy-current losses in semicircle-section wound core of transformer // IEEE Transactions on magnetics. 2019. Vol. 55. No. 11. 6300612. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2927194
- [13] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

References

- [1] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated Feb. 8, 2019 no. 81 “Ob utverzhdenii trebovanij k peregruzochnoj sposobnosti transformatorov i avto-transformatorov, ustanovlennyh na ob"ektah elektroenergetiki, i ee podderzhaniyu i o vnesenii izmenenij v Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stancij i setej Rossijskoj Federacii, utverzhdennye prikazom Minenergo Rossii ot 19 iyunya 2003 g. N 229 [On approval of requirements for the overload capacity of transformers and autotransformers installed at electric power facilities, and its maintenance and on amendments to the Rules for the technical operation of power plants and networks of the Russian Federation, approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated June 19, 2003 N 229]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903290030> [Accessed: May 23, 2024] (in Russian).
- [2] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated Aug. 12, 2022 no. 811 “On the approval of the Rules for the technical operation of electrical installations of consumers of electrical energy [Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej elektricheskoy energii]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210070065> [Accessed: May 23, 2024] (in Russian).
- [3] Yu.V. Zhilkina and D.A. Vodennikov, “The influence of outdoor air temperature growth on the operation of power transformers”, *Bulletin of MPEI*, vol. 6, pp. 26-32, 2023. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-6-26-32.
- [4] A.A. Kokorev and E.N. Sosnina, “Study of the ambient temperature influence on the power transformer characteristics”, in *proc. V All-Russian scientific and practical*

- conf. "Problems and prospects of development of electric power engineering and electrical engineering [Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetikiy elektrotekhniki]", October 11-12, 2023, Kazan, Russia, vol. 1, pp. 104-109 (in Russian).
- [5] I.V. Zharinov, A.A. Kokorev and D.V. Myasnikov, "Study of the influence of operating conditions on the operation of transformers in idling mode", *Scientific News*, vol. 28, pp. 195-198, 2022 (in Russian).
- [6] A.N. Alyunov, O.S. Vyatkina and A.E. Nemirovskiy, "On efficiency of digital system of power transformer proactive diagnostics", *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 24, no. 5(154), pp. 966-976, 2020. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-966-976
- [7] S.S. Kostinskiy and K.V. Vasileva, "Experimental determination of temperature influence on no-load losses and transformation coefficient of power three-phase two-winding transformer", *Russian Electromechanics*, vol. 63, no. 4, pp. 56-62, 2020. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-4-56-62
- [8] Short circuits in electrical installations. Calculation methods in a.c. electrical installations with voltage below 1 kV, GOST 28249-93, Jan. 1995.
- [9] *Performance indicators*, Rosseti Center and Volga Region. [Online]. Available at: https://mrsk-cp.ru/stockholder_investor/performance/index.php?iblock_id=114/ [Accessed: May. 11, 2024].
- [10] S.A. Tsyruk and E.A. Kireeva, "Increase in the service reliability of power transformers worked beyond standard life time", *Industrial Power Engineering*, no. 3, pp. 11-15, 2008.
- [11] Power transformers. Electromagnetic test methods, GOST 3484.1-88, Jan. 1990.
- [12] C. Zhang, S. Gao, L. Zhou, J. Jiang and J. Cai, "Novel analytical formulas for eddy-current losses in semicircle-section wound core of transformer", *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 55, no. 11, 6300612, Nov. 2019. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2927194
- [13] Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov [Calculation of Transformers]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кокорев Андрей Александрович, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Andrey A. Kokorev, postgraduate student of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.

Elena N. Sosnina, Dr. Sci. (Eng.), professor, professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.